

分割パルス増幅法における第二高調波を用いた ビーム結合法の検討

白川晃 研究室 吉澤和希

1 序論

ファイバーはその構造から高冷却性能、高ビーム品質、高利得等の性能を発揮することができ、ファイバーレーザーは高平均出力レーザーに適していると言える。しかし、ファイバーレーザーで高エネルギーな超短パルスを生成することは容易ではない。高いピークパワーを持つパルスを光ファイバー等の誘電体内を伝搬させる際には、光強度により媒質中の屈折率が変化するために、様々な非線形光学効果が起きる。例えば、誘導ラマン散乱、誘導ブリルアン散乱等の非線形光学効果は、誘電体内に入る光を散乱させてしまい、パルスの状態を変化させてしまう。また、自己位相変調(SPM)や相互位相変調(XPM)も問題になってくる。これは、伝搬する光パルスの位相に影響を与え、パルスのコヒーレンスやパルス形状に影響を与えてしまう。

これらの非線形光学効果を回避しつつ高出力レーザーを開発する方法として、チャープパルス増幅法(CPA)[1]などの手法が開発されてきた。これは、光ファイバー内にパルスを伝搬させる前に、回折格子等でチャープさせることによりパルスのピークパワーを落とすことで非線形光学効果を回避し、その後自由空間内でパルス圧縮することで高ピークパワーのパルスを生成する手法である。しかし、CPAによる非線形光学効果の抑制には、物理的な制約があり、高出力化に限界がある。そこで、近年研究されているのが分割パルス増幅(DPA)という手法である。

CPAはパルスをチャープさせることによってピークパワーを抑制していたが、DPAはパルスを時間軸上で分割し、ピークパワーを下げ、光を増幅した後に再結合することで非線形光学効果を抑えつつ高出力化を図る手法である。この手法はCPAと併用でき、それによってCPAで課題となった物理的な限界を超えつつ、さらなるパルスの高エネルギー化を目指すことができる。

本研究室では、DPAにおいて、フォトダイオードとピエゾ素子を使う能動的な位相ロックを達成するためにHänsch-Couillaud (HC)法という位相ロック法を使ってDPAの研究を行ってきた[2]。しかし、この手法だとスケールアップができることが強みなDPAの特徴を活かせないということが判明した。具体的には、従来の手法では2分割したパルスを1つのパルスに再結合することは可能であるが、4分割されたパルスを2分割されたパルスに再結合する際に必要な位相差信号が検出できず、再結合が困難なことがわかった。そこで、この問題を克服するために第二高調波発生(SHG)を使った位相差検出法(SHG)法が提案された[3]。

本研究では、この問題を解決するためにSHG法を用いたDPA手法の確立を目標としている。SHGを用いた位相差検出法では、4分割から2分割に結合する過程での位相差検出に問題となる偏波状態の課題を解決できる。これにより、4分割DPAでの高エネルギー化手法を確立することを目標とする。

2 原理

2.1 分割パルス増幅

分割パルス増幅(DPA)の基本的なシステムの概念図を図1に示す。DPAは、発振器から出されたパルスをパルス分割器によって1つのパルスを複数のパルスに時間的に分割し、分割されたそれぞれのパルスを非線形効果が問題にならない程度まで増幅したあと、パルス結合器によって再びパルスを1つにして高出力超短パルスを得る手法である[4]。

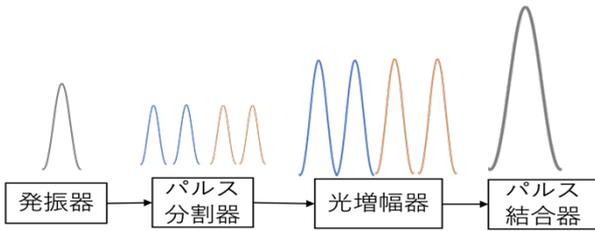
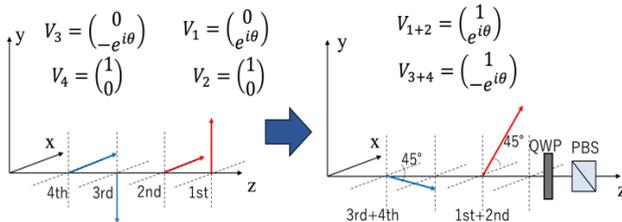


図1 DPAの基本システム

2.2 Hänsch-Couillaud(HC)法での位相差検出と4分割時の問題点

先行研究では2分割でのDPAにおいて、HC法という手法を用いて位相差信号である時間的な干渉縞を検出し、PID制御によりこの位相差を補償し分割されたパルスの位相を一致させることでパルスを結合させていた。しかしこの手法は、4分割時では分割されたパルスの偏波状態により原理的に不可能である。以下にその理由を示す。



※ θ は1stと2nd、3rdと4thの位相差

図2 HC法を用いる4分割されたパルスの偏波状態の概略図

図2は4分割されたパルスである1stパルス、2ndパルス、・・・が結合される時の偏波状態を、概略図とジョーンズベクトルで表したも

のである。この図のPBS透過以降のパルスの偏波状態をジョーンズベクトル表現法で表すと以下ようになる。ただし、 θ は分割器によって分割されたパルス同士の位相差(ここでは1stと2nd、3rdと4thパルス間の位相差)、 P_x 、 W_{QWP} はそれぞれ偏光ビームスプリッター、1/4波長板に対応したジョーンズベクトルである。

$$\begin{aligned} V'_{1+2} &= P_x W_{QWP} V_{1+2} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 - i \left(1 - 2 \sin^2 \frac{1}{4} \pi\right) & -i \sin \frac{1}{2} \pi \\ -\sin \frac{1}{2} \pi & 1 + i \left(1 - 2 \sin^2 \frac{1}{4} \pi\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ e^{i\theta} \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} e^{i\theta} - i \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V'_{3+4} &= P_x W_{QWP} V_{3+4} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 - i \left(1 - 2 \sin^2 \frac{1}{4} \pi\right) & -i \sin \frac{1}{2} \pi \\ -\sin \frac{1}{2} \pi & 1 + i \left(1 - 2 \sin^2 \frac{1}{4} \pi\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ -e^{i\theta} \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} e^{i\theta} - i \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

フォトダイオードが検知する光強度 I_F は、

$$I_F = I_{1+2} + I_{3+4} \quad (3)$$

$$I_{1+2} = |V'_{1+2}|^2 = -\sin \theta + 1 \quad (4)$$

$$I_{3+4} = |V'_{3+4}|^2 = \sin \theta + 1 \quad (5)$$

$$I_F = 2 \quad (6)$$

となる。ここで、 V_{1+2} 、 V_{3+4} はそれぞれ1st+2ndパルス、3rd+4thパルスのジョーンズベクトル。以上より、フォトダイオードで検出される光強度 I_F には位相差 θ の項が含まれておらず、位相差検出が行えない。つまり、PBS通過後のパルスの偏波状態での干渉では位相差信号である時間的な干渉縞が検出されず、この干渉縞を用いた位相ロック法が行えないことがわかる。

2.3 SHGを用いた位相差検出法

前節でHC法では4分割時には位相差信号であるパルス同士の時間的な干渉縞が検出できないことを示した。この節ではSHGを用いた位相差検出法(SHG法)について説明する。SHG法は、式(6)で示した、位相差 θ が検出できないという

HC 法の問題を、SHG を用いることで回避する手法である。これは、発生した SHG はその基本波の強度の 2 乗に比例するという特性により克服される。具体的には、フォトダイオードの前に非線形光学結晶を挿入し、SHG 光を発生させることにより、位相差信号として用いられる光強度 I_{1+2} 、 I_{3+4} を SHG 光の光強度に変換することで、位相差信号であるフォトダイオードが検出する光強度 I_F に位相差 θ の項が含まれるようにする。以下に、より具体的な SHG 法の原理を示す。

図 3 に SHG 法での偏波状態とそのジョーンズベクトル表現法で表した図を示す。

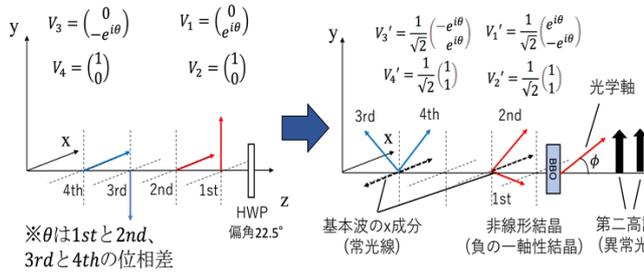


図 3 SHG 法を用いる場合の 4 分割されたパルスの偏波状態

HC 法で求めた時と同様に、結合されたパルスの光強度をジョーンズベクトル表現法で表すと、

$$I_{(1+2)x} = |V'_{1+2}|^2 = 1 + \cos \theta \quad (7)$$

$$I_{(3+4)x} = |V'_{3+4}|^2 = 1 - \cos \theta \quad (8)$$

と表され、また、これらが SHG に変換された時の光強度 $I_{(1+2)}^{SHG}$ 、 $I_{(3+4)}^{SHG}$ はそれぞれ、

$$I_{(1+2)}^{SHG} = I_{(1+2)x}^2 = \frac{1}{2} \cos 2\theta + 2 \cos \theta + \frac{3}{2} \quad (9)$$

$$I_{(3+4)}^{SHG} = I_{(3+4)x}^2 = \frac{1}{2} \cos 2\theta - 2 \cos \theta + \frac{3}{2} \quad (10)$$

と求まり、フォトダイオードが検知する光強度 I_F は、

$$I_F = I_{(1+2)}^{SHG} + I_{(3+4)}^{SHG} = 3 + \cos 2\theta \quad (11)$$

となり、 θ の関数として求まる。これにより、4 つのパルスから 2 つのパルスに結合する場合でも位相差 θ を検出することができる。

3 実験と考察

3.1 実験系概要

本研究ではシードパルス光として全正常分散型モード同期レーザーのパルスを用いた。中心波長 1030nm、帯域幅およそ 9.5nm、繰り返し

周波数 20MHz のパルスが出力された。発振器より出力されたパルスのスペクトルを図 4 に示す。

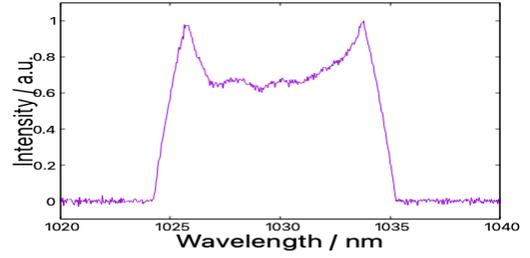


図 4 発振器出力スペクトル

次に、発振器後にポッケルスセルを配置し、適宜パルスを一定間隔で間引き、繰り返し周波数を 400kHz に低下させた。これは増幅後のパルスエネルギーを高め、SHG 変換効率を向上させる目的で選択的に用いられた。また、SHG 法での実験で用いた実験系の概略図を図 5 に示す。

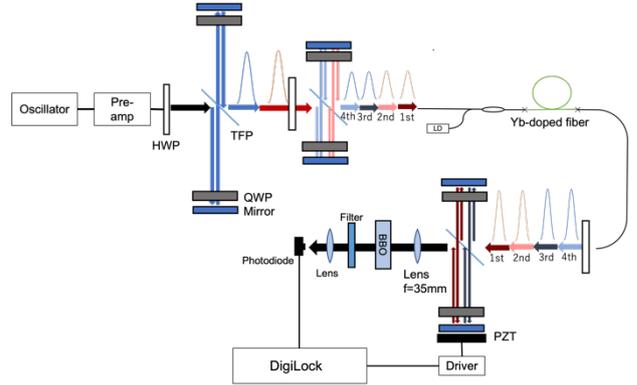


図 5 SHG 法での位相差信号検出セットアップ

偏波保持 Yb 添加ファイバーにより前置増幅をした後、図 5 のように分割パルス増幅し、SHG 法を用いて結合時に必要な干渉縞の検出を行なった。

分割器には、1/2 波長板(HWP)、薄膜偏光子(TFP)、1/4 波長板(QWP)、ミラーを用いた。ミラー間の距離をそれぞれ 40cm、20cm とすることで分割されたパルスはそれぞれ合計 80cm、40cm の遅延路を通ることにより、パルス間に約 2.6ns、1.3ns の遅延時間を与え、パルスを 4 分割した。

メインアンプにて増幅後、 piezoelectric 素子がついたミラーを用いた結合器にてパルスを結合し

た。この piezo 素子には振幅 20V の正弦波状の電圧が印加されており、これにより結合器のミラー間、すなわち遅延路が正弦波状に振動し、これにより観測されるパルス間同士の時間的な干渉縞を位相差検出に用いた。このとき用いた piezo 素子は $0.15\mu\text{m}/\text{V}$ で変位するため、最大 $3\mu\text{m}$ の変位があった。また、フォトダイオードにより光強度を検出する際にはショートパスフィルターを用いて SHG 光のみ検出されるようにした。

3.2 時間的な干渉縞の数値計算

観測される時間的な干渉縞を評価するために、piezo 素子への印加電圧とパルス間位相差の関係と、フォトダイオードで検出される SHG の光強度の位相差の関数式(9)、(11)から時間的な干渉縞を数値計算した。以下図 6、7 に数値計算した時間的な干渉縞を示す。

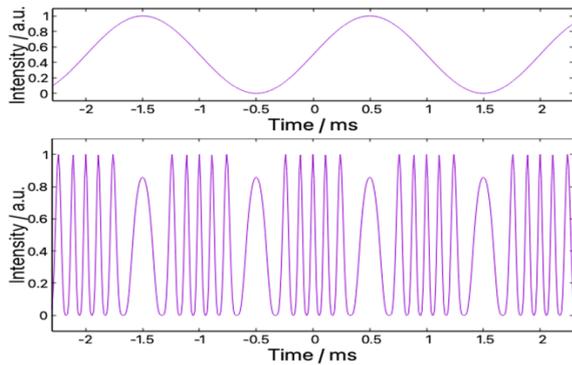


図 6 piezo 素子への印加電圧(上)。及び 2 分割時に観測される時間的な干渉縞の数値計算(下)。

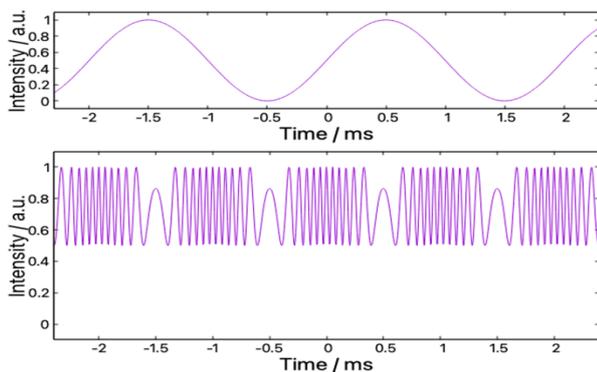


図 7 piezo 素子への印加電圧(上)。及び 4 分割時に観測される時間的な干渉縞の数値計算(下)。

ここで、観測される時間的な干渉縞について評価する指標として明瞭度(ビジビリティ) η_v を以

下のように定義する。

$$\eta_v = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (12)$$

I_{max} 、 I_{min} はそれぞれフォトダイオードで検出された時間的な干渉縞の最大値、最小値である。式(12)より、計算された干渉縞の明瞭度 η_v を求めると、2 分割時では $\eta_v = 1$ 、4 分割時では $\eta_v = 0.33$ であり、4 分割時の時間的な干渉縞の明瞭度 η_v の理論上の上限値は 33%であることがわかる。また、干渉縞の概形について次のようなことが言える。まず 2 分割時について、観測される光強度の式(9)に含まれる \cos 関数の 2θ と θ の作用により干渉縞の山の部分(I_{max})と谷の部分(I_{min})の形がそれぞれより鋭利な形状、より丸みを帯びた形状となっている。また、4 分割時では 2θ の項による作用が大きくなるために、2 分割時と比べ振動数が 2 倍になっていることがわかる。

3.3 SHG 法での位相差検出

図 5 で示した実験系を用いて、SHG 法で 2 分割パルスおよび 4 分割パルスの位相差検出の実験を行なった。このとき、図における 1 つ目の分割器前の HWP を調整することでパルスを 2 分割や 4 分割にした。検出する際にはその都度ミラーの角度、ミラー間の距離を微調整することで干渉縞の明瞭度 η_v が最大になるようにした。SHG 法で検出された 2 分割時、4 分割時の時間的な干渉縞はそれぞれ以下ようになった。

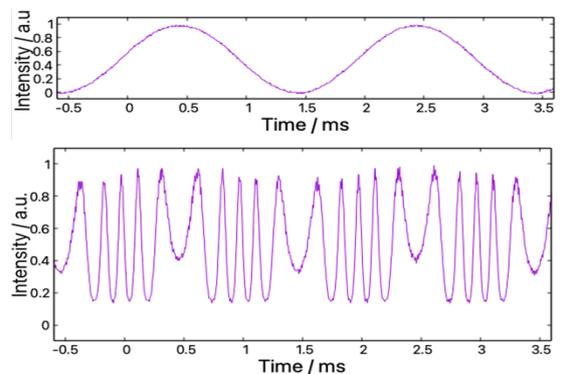


図 8 piezo 素子への印加電圧(上)及び 2 分割時に観測された時間的な干渉縞。

まず、2 分割時の干渉縞について、図 8 を見ると、概ね数値計算と一致していることがわか

る。特に、干渉縞の山の部分(I_{max})と谷の部分(I_{min})の形が似ていると言える。また、4分割時の干渉縞を図9に示す。これを数値計算で求めた干渉縞と比較すると、 I_{max} と I_{min} の値の差が $\frac{1}{2}$ 倍程度になっておりほぼ数値計算と同じであるといえる。また、2分割時の干渉縞と比べ振動数が2倍になっていることも数値計算の結果と一致しているといえ、4分割時の位相差信号として妥当性のある結果であると言える。

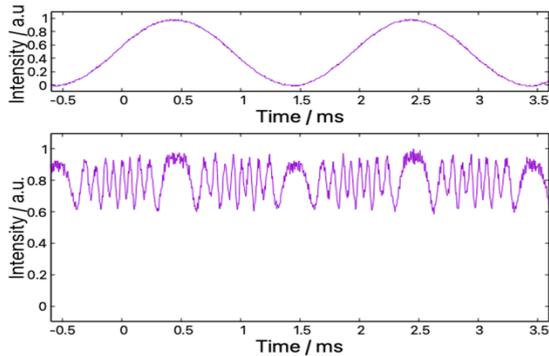


図9 ピエゾ素子への印加電圧(上)。及び4分割時に観測された時間的な干渉縞。

また、観測されたこれらの時間的な干渉縞から求められる2分割時、4分割時明瞭度 η_v は、それぞれ $\eta_v = 74\%$ 、 $\eta_v = 26\%$ であった。同じ条件で観測したHC法での2分割時の干渉縞の明瞭度が $\eta_v = 81\%$ であったことから、SHG法にしたことによる明瞭度の低下は2分割時には7%であった。この明瞭度の低下の原因については、干渉縞の山の部分の値が変動していることから、光軸の不一致などのアライメント、また、SHG光での観測のため、遅延路を通ったパルスとそうでないパルスとでのビーム径の違いによる影響が大きくなったと考えられる。

3.4 フィードバック光を用いた干渉縞の観測

実際にパルスを結合し、出力光として利用するためには、そのごく一部をピックアップした微弱なフィードバック光で時間的な干渉縞の観測ができることが必要である。そこで、以下の図10のような実験系を構築し、微弱なフィードバック光で時間的な干渉縞を観測した。

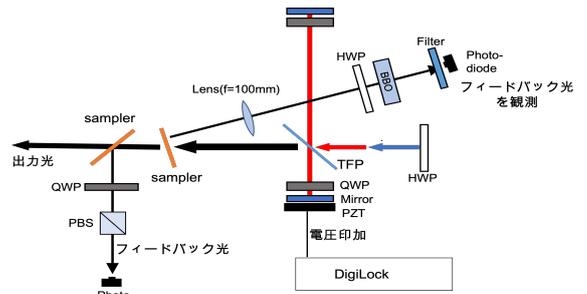


図10 フィードバック光による位相差信号検出セットアップ

結合パルスの光路上に光の一部を反射する部分反射鏡(sampler)を用いてフィードバック光を形成した。SHGの変換効率の向上のために、ポッケルスセルにより繰り返し周波数を400kHzに低下させ、パルスエネルギーを高めた。この時、PDの応答速度がパルスの繰り返し周波数を上回るとパルスの強度信号が個別に認識されてしまうため、PDを適切な応答速度に低下させ観測した。以下にフィードバック光によって観測された時間的な干渉縞を示す。

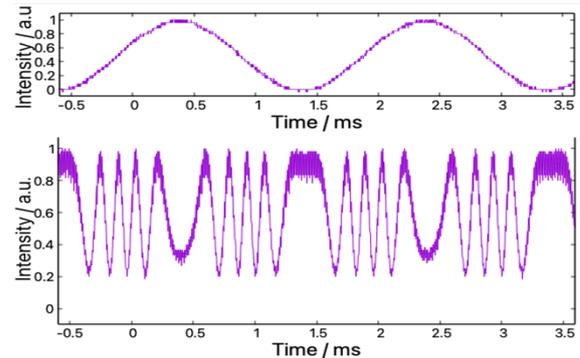


図11 ピエゾ素子への印加電圧(上)。及びHC法2分割時のフィードバック光を用いた時間的な干渉縞(下)。

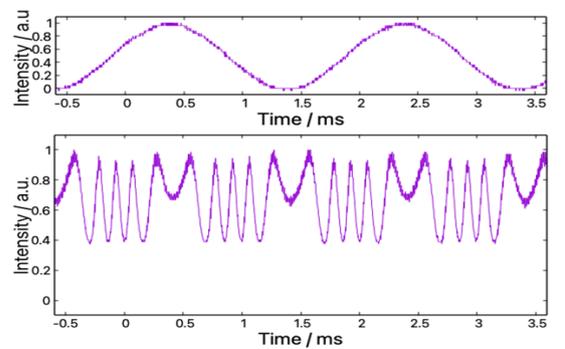


図12 ピエゾ素子への印加電圧(上)。及びSHG法2分割時のフィードバック光を用いた時間的な干渉縞(下)。

図 11、12 はそれぞれ HC 法、SHG 法で観測した時間的な干渉縞である。計算される明瞭度 η_v はそれぞれ $\eta_v = 69\%$ 、 $\eta_v = 45\%$ であり、3.3 節の出力光を作らない時の結果と比べ SHG 法にすることによる明瞭度の低下が大きくなるという結果になった。これは、微弱なフィードバック光を用いたことによるパルスエネルギーの低下から、遅延路經由有無によるパルス間のビーム径の差の影響が大きくなったためと考えられる。

4 まとめ

本研究では、ファイバーレーザーにおける分割パルス増幅法において第二高調波を用いた 4 分割パルスのビーム結合法についての実験を行った。従来の HC 法を用いた能動的な位相ロック法の結合器では 4 分割されたパルスにおいて位相差信号を検出できなかったが、第二高調波を用いた位相差検出法を用いることで 4 分割されたパルス同士の時間的な干渉縞を観測することができた。また、検出された位相差信号であるパルス同士の時間的な干渉縞を数値計算し、観測した干渉縞を評価した。その結果、観測結果が計算結果と概ね一致しているという結果が得られ、本研究の手法により位相差信号が得られることがわかった。しかし、同時に観測した HC 法の 2 分割の干渉縞の明瞭度 η_v と比べ、SHG 法 2 分割、4 分割で観測した干渉縞の明瞭度 η_v が若干低下した。これは、増幅器から出射されたビームのビーム広がり、遅延路を通ったビームとそうでないビームとで差異ができ、そのビーム径の違いが SHG に変換される光強度に影響しているからだと考えられた。そのため、遅延路上でレンズによるビーム径補償を行うことが望ましいと考えられる。また、この位相差信号を使って 2 分割されたパルスの結合波を実際に出力光として取り出すための結合器の実験系を構築した。その結果、さらに検出される干渉縞の明瞭度 η_v が下がるという結果になっ

た。これは、パルス光の一部を反射するミラーを用いてサンプリングすることでパルスエネルギーが低くなり、パルスエネルギー密度の観点からビーム径による SHG への変換効率の差異の影響がより大きくなったためと考えられた。また、このような検出法で SHG 法での 4 分割パルスの時間的な干渉縞の観測を試みたが、観測できなかった。

今後の展望として、より高い明瞭度 η_v を得て結合効率を高めるために、遅延路を通過したビームとそうでないビームとのビーム径の差異を減らすことが求められる。よって、遅延路にレンズを挿入し、ビーム径の補償を行うことが望まれる。また、パルスエネルギーを高め、なるべくビーム径の影響を低下させることも望まれる。

5 参考文献

- [1] Donna Strickland and Gerard Mourou, “Compression of amplified chirped optical pulses.”, *Optics Communications*, Vol.56, No.3, pp.219-224, 1985.
- [2] 杉本洸太, 「分割パルスファイバー増幅およびチャープパルス増幅による高エネルギー超短パルスの発生」, 2019 年度卒業論文 (電気通信大学)
- [3] 三宅晴之, 「分割パルスファイバー増幅およびチャープパルス増幅による高エネルギー超短パルスの発生」, 2022 年度卒業論文 (電気通信大学)
- [4] M. Kienel, A. Klenke, T. Eidam, S. Hädrich, J. Limpert, and A. Tünnermann, “Energy scaling of femtosecond amplifiers using actively controlled divided-pulse amplification”, *Optics Letters*, Vol.39, No.4, pp.1049-1052, 2014.